

长洲五线船闸下引航道通航水流条件试验研究

李艳^{1,2}, 黄军³, 刘洋^{1,2}, 马立²

(1. 西南水利水运工程科学研究院, 重庆 402247; 2. 重庆西科水运工程咨询有限公司, 重庆 402247;
3. 重庆市水利投资(集团)有限公司, 重庆 401100)

摘要: 近年随着长洲枢纽货运量持续高速增长, 现有4线船闸已不能满足日益增长的货运量过闸要求, 需修建五线船闸来满足货运量发展需求。采用整体水工模型试验的方法, 研究长洲五线船闸下引航道口门区的通航水流条件, 并提出下引航道通航条件的改善措施。结果表明, 受长洲五线船闸下引航道口门区河床地形不衔接、外江下泄水流斜冲和下游弯道凸嘴顶托等问题, 口门区存在较大横流和回流等不良流态, 通航条件较差。通过采取调整口门区下游衔接段河底高程、削除下游弯道凸嘴、疏浚扩挖外江河道左岸边滩等措施, 可有效改善五线船闸下引航道口门区通航水流条件, 调顺船舶进出闸航线, 使之满足船舶安全航行要求。

关键词: 船闸; 引航道; 口门区; 通航条件

中图分类号: U612.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)10-0104-06

Experimental research on navigation flow conditions in downstream approach channel of Changzhou fifth-line ship lock

LI Yan^{1,2}, HUANG Jun³, LIU Yang^{1,2}, MA Li²

(1. Southwest Research Institute for Hydraulic and Water Transport Engineering, Chongqing 402247, China;
2. Chongqing Xike Water Transport Engineering Consulting Co., Ltd., Chongqing 402247, China;
3. Chongqing Water Conservancy Investment (Group) Co., Ltd., Chongqing 401100, China)

Abstract: With the continuous rapid growth of freight volume of Changzhou Hub in recent years, the four existing locks can no longer meet the increasing requirements of freight volume crossing, and the fifth-line lock need to be built to meet the needs of freight volume development. Based on the method of integral hydraulic model test, this paper studies the navigation flow condition in the entrance area of downstream approach channel of Changzhou fifth-line ship lock, and it puts forward the measures to improve the navigation conditions of the downstream approach channel. The results show that, affected by the unconnected riverbed topography in the entrance area of the downstream approach channel of the fifth-line ship lock, the oblique flushing of the discharge flow from Waijiang River and the jacking of the convex nozzle in the downstream bend, there are bad flow patterns such as large cross flow and backflow in the entrance area, and the navigable flow conditions are poor. By adoption of measures such as adjusting the river bottom elevation of the downstream connection section of the entrance area, removing the downstream curve convex, dredging and expanding the beach on the left bank of the Waijiang River, which can effectively improve the navigation flow conditions in the entrance area of the five-line ship lock, and adjust the routes of ships entering and leaving the lock, so as to meet the safety navigation requirements of ships.

Keywords: ship lock; approach channel; entrance area; navigation condition

收稿日期: 2023-12-25

作者简介: 李艳(1985—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事水利水运工程方向研究。

船闸上、下游引航道口门区及连接段水流条件的好坏直接关系到船舶(队)能否畅通进出引航道、安全过坝及运行,是通航河流航电枢纽平面布置的关键问题之一。国内已有大量针对引航道通航水流条件的研究成果。李伟等^[1]提出船闸下引航道口门区回流长度的计算公式,得出回流长度与引航道宽度、水流流速、水深等有关。李艳等^[2]结合工程现场条件,通过调整船闸平面尺度,增大引航道长度及口门宽度,有效改善了船舶进出闸条件。赵志舟等^[3]研究下游引航道长度、隔流墙堤头布置形式、堤身开孔等工程措施对乌江银盘电站下游引航道口门区通航条件的影响,提出合理的引航道布置方式。周家俞等^[4]对赣江石虎塘通航建筑物的辅导航墙长度进行研究,提出既满足通航要求又节约工程投资和工期的辅导航墙长度。彭永勤等^[5]提出白石窑一线船闸(船闸尺度变更)坝下三板洲浅滩开挖和增设直线隔流堤的措施,极大改善了下引航道口门区通航水流条件。朱红等^[6]研究船闸下游引航道口门区增设导流墩情况下的通航水流条件,认为导流墩是削弱口门区回流、减小横向流速的有效工程措施。

近年长洲枢纽货运量持续高速增长,其中2020—2022年货物通过量均超过1.5亿t,接近现有4座船闸的设计年总通过能力。长洲枢纽现有4线船闸已不能满足日益增长的货运量过闸要求,

需要修建五线船闸来满足货运量发展需求。

为研究长洲水利枢纽五线船闸平面布置与通航水流条件的问题,开展整体定床物理模型试验^[7]。本文以长洲五线船闸下游引航道口门区的通航水流条件研究为例,对设计方案进行优化试验,验证确定新建船闸平面布置方案的可行性及改善通航水流条件的措施,并在此基础上提出满足要求的船闸平面布置方案。

1 工程概况

长洲水利枢纽位于西江干流浔江河段的长洲岛上,是一座具有航运、发电、灌溉和养殖等综合利用效益的大型水利枢纽工程。长洲枢纽地处两岛三江(包括长洲岛、泗化洲岛及内江、中江和外江)分汊河段,其最大河宽约3 200 m,最大的长洲岛长约8 300 m、宽约2 000 m。

枢纽主要建筑物包括:总计45孔、宽12 m的内江、中江和外江泄水(冲沙)闸;装机总台数为15台、总容量为630 MW的内江和外江电厂;已建4线船闸,其中一线船闸尺寸200 m×34 m×4.5 m(长×宽×门槛水深)、通航2 000吨级船舶,二线船闸尺寸185 m×23 m×3.5 m、通航1 000吨级船舶,三、四线船闸尺寸340 m×34 m×5.8 m、通航均为3 000吨级船舶。长洲水利枢纽河段河势见图1。

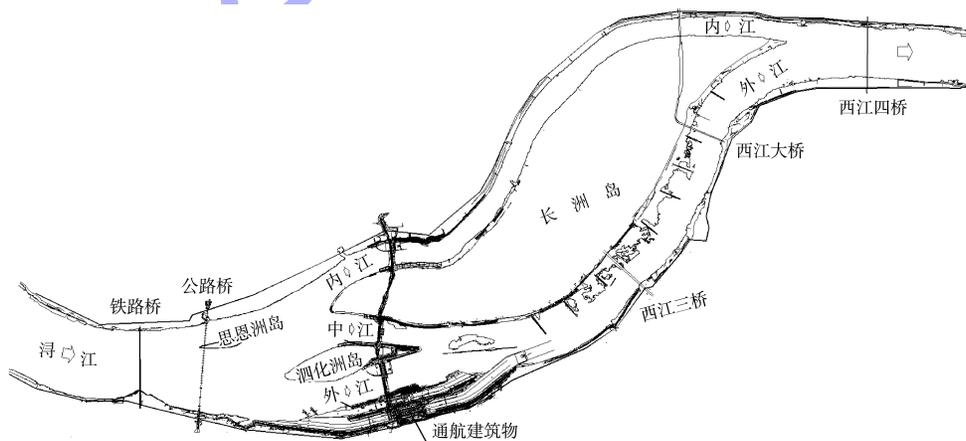


图1 长洲水利枢纽河段河势

2 模型设计及水流流速指标

模型按重力相似和阻力相似的准则进行设计,几何比尺为1:125(正态)。模拟范围包括长洲枢纽

外江坝址上游约6.2 km至坝址下游11.5 km,全长约17.7 km。

根据JTJ 305—2001《船闸总体设计规范》^[8]的

规定, 船闸上、下游引航道口门区水面最大纵向流速 ≤ 2.0 m/s、横向流速 ≤ 0.30 m/s、回流流速 ≤ 0.4 m/s; 引航道导航和调顺段内应为静水区, 制动段和停泊段的水面最大纵向流速 ≤ 0.5 m/s、横向流速 ≤ 0.15 m/s; 引航道、口门区宜避免出现泡漩、乱流等不良流态。

3 设计方案通航水流条件

3.1 下引航道平面布置

长洲五线船闸等级为I级, 按照通航 3 000 吨级船舶建设(兼顾 5 000 吨级), 船闸有效尺寸采用

340 m \times 34 m \times 6.9 m。设计推荐方案位于外江右岸, 与既有船闸同岸布置, 船闸中心轴线与 4 线船闸中心轴线相距 135 m。船闸引航道平面上采用不对称型布置, 上、下游船舶过闸均采用“曲进直出”的方式。其中, 下游引航道长 1 659.5 m, 直线段长 616 m, 包括导航调顺段 216 m、停泊段 400 m, 设置 16 个中心距 25 m 的靠船墩。下游引航道底宽 80 m, 底高程-5.5 m。靠船段下游 450 m 处设置长 400 m 的待泊区以满足船舶待闸的需要。下游引航道口门位置与主航道距离约 420 m, 口门区直接与主航道衔接。五线船闸下引航道设计方案平面布置见图 2。

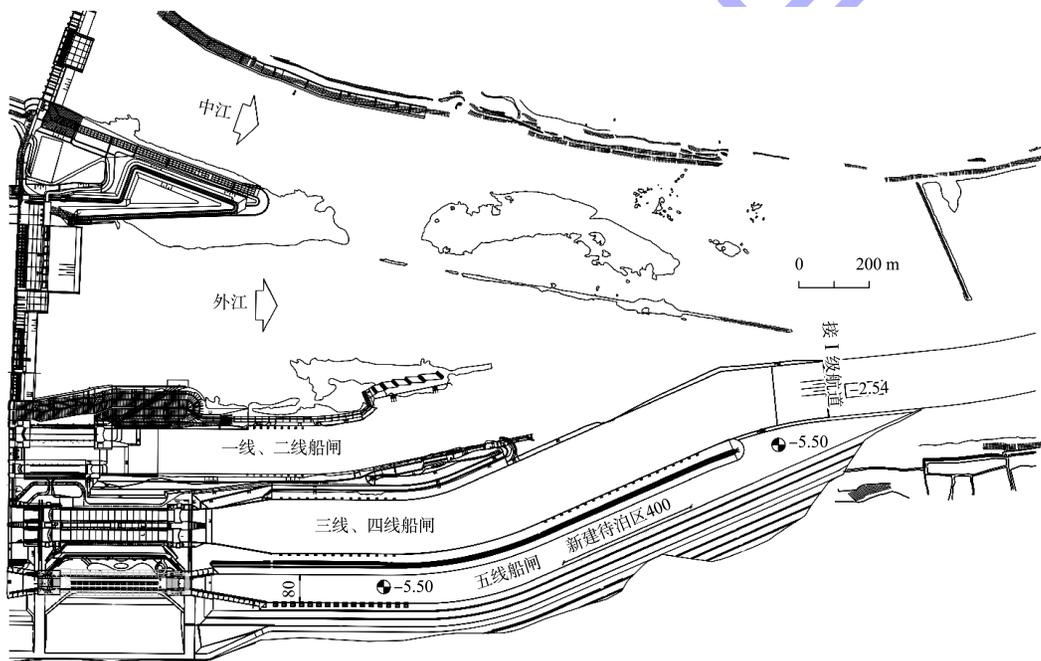


图 2 长洲五线船闸下引航道平面布置 (设计方案) (单位: m)

3.2 通航水流条件分析

图 3 为不同流量下五线船闸下引航道口门区流速分布。根据试验观察, 在流量 $Q \leq 7 450$ m³/s (机组满发流量) 的各级流量下, 外江水流自上游左侧外江电站厂房出流后逐渐右偏冲入下游右侧主航道, 在五线船闸下引航道口门区下段(左侧导航墙堤头下游 240~490 m 范围)水流集中, 最大纵向流速 0.88~1.91 m/s, 最大横向流速 0.44~0.76 m/s, 横向流速明显超标; 受河势条件和右侧河岸弯道凸嘴顶托的影响, 在五线船闸下引航道

口门区上段(左侧导航墙堤头下游 0~240 m 范围)产生较大范围的回流区, 最大回流流速(0.54 m/s)超标。

当 $Q > 7 450$ m³/s 时, 根据枢纽调度运行方式, 中江参与泄流, 外江和中江水流在泗化洲岛尾部汇合后, 河道流速分布趋于均匀, 水流过下游弯道后主流靠右而下, 五线船闸下引航道口门区的回流逐渐减小直至消失。在流量分别为 21 000 m³/s (敞泄分界)、34 500 m³/s ($P=20\%$) 和 43 200 m³/s ($P=5\%$)、枢纽全闸敞泄时, 五线船闸下引航道

口门区上段最大纵向流速分别为 0.78、0.75 和 1.13 m/s, 最大横向流速分别为 0.44、0.44 和 0.46 m/s; 口门区下段最大纵向流速分别为 1.37、1.90 和 1.94 m/s, 最大横向流速分别为 0.54、

0.59 和 0.58 m/s。下引航道口门区横流超标区主要位于口门区中下段, 对船舶进出闸安全产生一定的不利影响。



图 3 五线船闸下引航道口门区流速分布 (设计方案) (单位: m/s)

4 通航水流条件改善措施

设计方案通航水流条件试验表明, 在各级中小流量情况下, 外江水流自上游左侧电站厂房出流后, 受地形及河势影响, 下泄水流逐渐右偏斜向冲入下游主航道, 水流集中。水流进入下游引航道口门区附近后, 又受到口门区下段较高地形及右岸弯道凸嘴顶托的影响, 使五线船闸下引航道口门区下半段流速明显增大, 横流超标较多, 其上游出现较大范围的回流区, 对船舶进出闸造

成不利影响。此外, 由于五线船闸口门区设计底高程为-5.50 m, 其左侧和下游河床高程为-3.60~-2.54 m, 存在 1.90~2.96 m 的高差, 在小流量时亦会加强该处的斜流效应。

为改善长洲五线船闸下引航道口门区存在的斜流和回流等不良流态, 调顺船舶进出闸航线, 试验研究提出调整口门区下游衔接段河底高程、削除下游弯道凸嘴、延长外导航墙长度、疏浚扩挖外江河道左岸边滩等措施, 各修改措施平面布

置见图4,各方案改善效果对比分析见表1。对比分析可知,修改方案2通过调整长洲五线船闸下引航道口门区河床高程及削除下游弯道凸嘴,可有效降低中小流量时五线船闸下引航道口门区的回流大小(降幅0.18 m/s),同时调顺船舶进出闸

航线,对船舶进出闸航行操纵有利,但下段水域横流仍偏大(最大横向流速0.71 m/s)。此外,试验研究亦发现延长五线船闸下引航道外导航墙(隔水墙)长度后,口门区位置随之下移,但其流速流态变化不大,改善效果不明显。

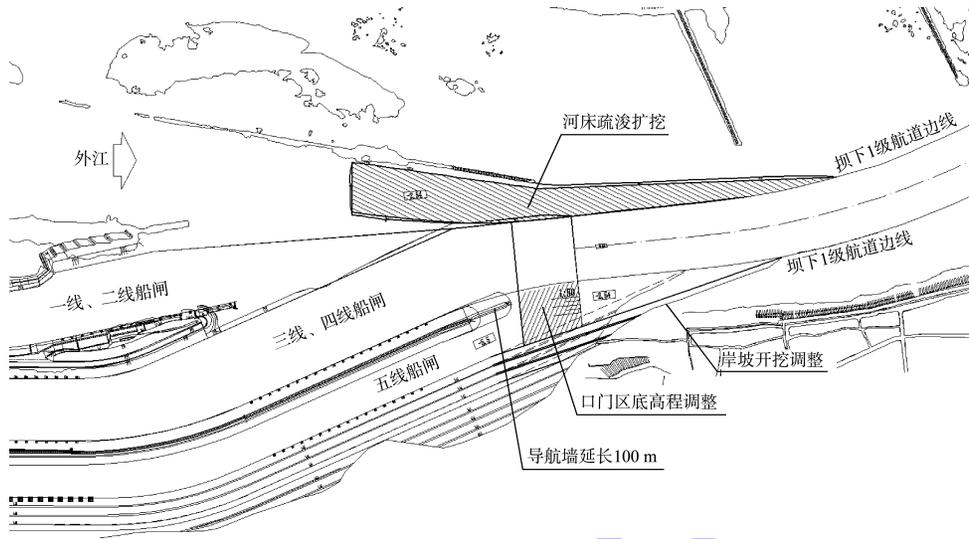


图4 长洲五线船闸下引航道各修改措施平面布置

表1 各修改方案采取的措施及效果分析

修改方案	改善措施	效果分析
1	调整下引航道口门区河床高程:从高程-5.5 m按1:50坡比与下游I级航道起点-2.54 m高程平顺衔接;对右岸岸线进行调整,适当削除弯道凸嘴	在中小流量情况下,五线船闸下引航道口门区内回流强度明显减弱(由0.54 m/s降至0.36 m/s),中下段最大横向流速0.46~0.71 m/s,超标仍较多
2	在修改方案1基础上,延长下引航道外导航墙(隔水墙)长度约100 m	口门区的流速流态与方案1基本一致,横流仍偏大,效果不明显
3	在修改方案1基础上,对左岸顺坝以外一定范围的河床进行疏浚扩挖,经多方案比较确定开挖方案为:高程-2.54 m,疏浚长度1 210 m,最大宽度105 m,开挖多在1.0 m左右,总方量约5.8万m ³	五线船闸下引航道口门区上段水流条件基本满足安全通航的要求;口门区下段最大横流0.43~0.48 m/s,口门外侧长230~290 m、宽约30~60 m的范围(实为主航道水域)超标。结合船模试验,其通航条件满足航行要求

结合河势条件分析,外江水流自上游左侧电站厂房流出后,受左岸较高河床地形及顺坝导流的影响,下泄水流逐渐右偏斜向冲入下游主航道,是造成水流集中和下引航道口门区横流偏大、流态复杂的根本原因。在修改方案1基础上,修改方案3对左岸顺坝以外一定范围的河床进行适当疏浚扩挖后,口门区上段水流呈一顺时针弱回流,

回流范围及强度随流量增加逐渐减小,并逐渐演变为靠右岸的贴壁回流,回流均小于0.40 m/s,满足规范要求;口门区下段流速有所减缓,水流归顺,最大横流降至0.48 m/s。根据表2和图5可知,修改方案3五线船闸下游引航道口门区通航条件得到有效改善,可满足最高通航流量20 a一遇洪水时的通航要求,建议作为推荐方案。

表 2 五线船闸下引航道口门区特征流速 (修改方案 3)

$Q/(m^3/s^{-1})$	最大纵向流速/ $(m \cdot s^{-1})$		最大横向流速/ $(m \cdot s^{-1})$		最大回流流速/ $(m \cdot s^{-1})$	
	口门区上段	口门区下段	口门区上段	口门区下段	口门区上段	口门区下段
2 500	0.07	1.09	0.17	0.36	0.39	0
7 450	0.04	1.09	0.28	0.39	0.38	0
21 000(敞泄分界流量)	0.73	1.38	0.34	0.45	0.15	0
34 500($P=20\%$)	0.81	1.88	0.36	0.43	0.12	0
43 200($P=5\%$)	1.03	1.84	0.33	0.48	0.07	0

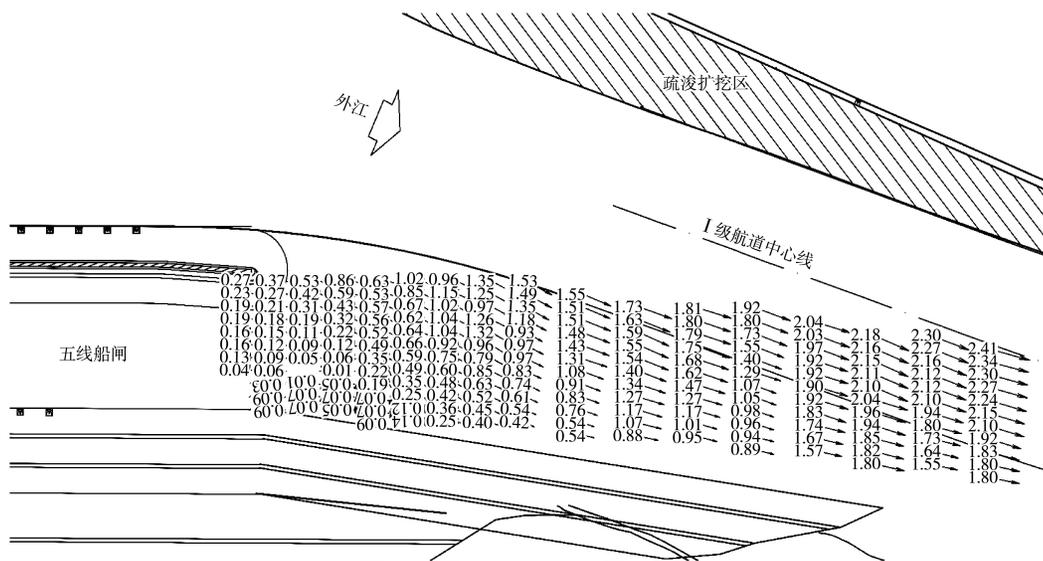


图 5 五线船闸下引航道口门区流速分布 (修改方案 3, $Q=43\ 200\ m^3/s$)

5 结语

1) 受长洲五线船闸下引航道口门区河床地形不衔接、外江下泄水流斜冲和下游弯道凸嘴顶托等问题, 口门区存在较大横流和回流等不良流态, 通航水流条件较差。

2) 修改方案 1 通过调整长洲五线船闸下引航道口门区河床高程及削除下游弯道凸嘴, 可有效降低中小流量时五线船闸下引航道口门区的回流大小, 同时调顺船舶进出闸航线, 对船舶进出闸航行操纵有利。

3) 修改方案 2 在方案 1 基础上, 延长五线船闸下引航道外导航墙(隔水墙)长度, 口门区位置随之下移, 但其流速流态变化不大, 改善效果不明显。

4) 修改方案 3 在方案 1 的基础上, 对左岸顺坝以外一定范围的河床进行适当疏浚扩挖后, 五线船闸下游引航道口门区通航水流条件得到有效改善, 满足最高通航流量 20 a 一遇洪水时的通航要求, 可为类似工程提供参考。

参考文献:

[1] 李伟, 张宝航. 船闸下引航道口门区回流特性及改善措施[J]. 水运工程, 2013(8): 160-164.

[2] 李艳, 张绪进, 刘洋, 等. 韩江南溪新建船闸通航水流条件试验研究[J]. 水道港口, 2020, 41(5): 585-589, 618.

[3] 赵志舟, 徐红, 彭凯. 乌江银盘电站下游引航道布置及口门区通航条件研究[J]. 水运工程, 2008(3): 82-86.

[4] 周家俞, 尹崇清, 王召兵, 等. 赣江石虎塘航电枢纽船闸引航道口门区通航水流条件试验研究[J]. 红水河, 2010, 29(6): 57-61.

[5] 彭永勤, 彭涛. 白石窑一线船闸闸室尺度变更后下引航道通航水流条件试验研究[J]. 水运工程, 2022(6): 106-111.

[6] 朱红, 郝品正. 导流墩改善船闸引航道口门区水流条件试验研究[J]. 水道港口, 2005, 26(2): 109-112.

[7] 西南水利水运工程科学研究院. 长洲水利枢纽五线船闸整体定床物理模型试验研究报告[R]. 重庆: 西南水利水运工程科学研究院, 2023.

[8] 中交水运规划设计院. 船闸总体设计规范: JTJ 305—2001[S]. 北京: 人民交通出版社, 2002.

(本文编辑 王传瑜)